

# KURT 화강암에서 우라늄의 지화학적 장기거동 해석

백민훈<sup>1\*</sup>, 박태진<sup>1</sup>, 신주도<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

<sup>2</sup>한국방사선진흥협회, 서울특별시 성동구 성수일로 77

\*mhbaik@kaeri.re.kr

## 1. 서론

방사성폐기물의 심지층 처분안전성 확보를 위해서는 수만에서 수 십 만년의 장기간에 처분시스템의 안전성 확보가 가장 중요하다. 특히, 처분시스템에서 환경으로 유출된 방사성 핵종의 장기거동은 이러한 장기적 처분안전성 관점에서 중요한 과정이다. 핵종들의 장기 거동에 대한 자료와 정보들은 실험실적 연구나 현장 연구를 통해서 확보하는데 한계가 있기 때문에, 자연유사연구를 통해 확보하는 것이 타당한 방법이라 하겠다[1]. 이러한 측면에서 본 연구는 한국원자력연구원 내 지하처분연구시설인 KURT(KAERI Underground Research Tunnel)의 고심도 시추공에서 채취한 화강암에 존재하는 자연 우라늄 핵종을 이용하여 암반을 통한 핵종들의 장기 거동을 해석하고자 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 시료 채취 및 분석

연구에 사용된 암석시료는 KURT의 다중패커가 설치된 DB-1 시험공의 시추코어에서 채취한 암석 시료들이며, 깊이별로 채취한 시료들의 기본 특성을 지하수 채취 위치와 비교하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Rock samples used in the study

Sample	Sampling Depth (m)	Corresponding GW sampling site (depth)	Major minerals
A	97	I3 (91.7 - 114.7 m)	Qz, Af, Pl, Mc/Il
B	108	I3 (91.7 - 114.7 m)	Qz, Af, Pl, Mc/Il, Cal
C	158	I4 (115.7 - 198.7 m)	Qz, Af, Pl, Mc/Il
D	202	I5 (199.7 - 228.7 m)	Qz, Af, Pl, Mc/Il
E	217	I5 (199.7 - 228.7 m)	Qz, Af, Pl, Mc/Il, Ka
F	218	I5 (199.7 - 228.7 m)	Qz, Af, Pl, Mc/Il, Ka
G	245	I6 (229.7 - 245.7)	Qz, Af, Pl, Mc/Il, Cl, Cal

화강암에서의 우라늄 분포 및 광물과의 결합특성, 우라늄 광물 형태를 확인하기 위하여 Electro-Probe Microscopic Analyzer (EPMA, Shimadzu EPMA-1610)를 이용한 backscattered electron image와 microprobe X-ray spectrum 분석을 수행하였다. 아울러 암석-지하수 장기거동 해석을 위해 암석에 존재하는 우라늄 동위원소(<sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U) alpha-spectroscopy 방법(CANBERRA, Alpha analyst)을 이용하여 분석하고 지하수 결과와 비교하였다. 또한 암석시료에 함유된 주요 원소들의 농도를 ICP-MS (Brüker, 820 ICP-MS)로 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Elemental concentration of rock samples

Sample	Concentration (µg/g)						
	A	B	C	D	E	F	G
Cs	11.2	10.7	18.3	6.14	4.23	3.78	5.66
Y	15.6	10.9	11.5	12.1	11.0	9.18	14.9
Ce	60.0	133	79.8	154	148	125	124
Eu	0.59	1.33	0.80	1.35	1.48	1.17	1.33
Th	18.2	30.5	12.9	32.5	30.0	26.6	17.3
U	13.7	13.2	9.22	4.76	3.24	3.19	3.67
Nb	26.6	20.7	14.6	25.1	19.2	16.4	24.0
Co	29.7	30.3	18.9	31.5	44.5	40.4	51.2
Pb	19.0	604	77.2	19.8	15.2	12.2	49.6
Zn	60.2	512	54.5	50.7	69.6	60.2	84.4
Zr	51.0	76.3	49.7	99.6	99.7	77.7	72.0
Fe*	1.55	1.21	1.78	1.68	2.48	1.50	1.75
Al*	9.22	8.17	9.38	9.00	7.85	8.32	6.86
Ca*	0.14	0.62	0.44	0.51	0.26	0.24	1.57
K*	4.52	4.61	4.26	3.70	3.80	2.84	2.80
Ti*	0.061	0.078	0.081	0.18	0.18	0.16	0.13
Th/U	1.33	2.31	1.40	6.83	9.26	8.34	4.71

\* Wt. %

### 2.2 화강암에서 우라늄 분포 및 결합 특성

분석에 사용된 화강암 시료 중에서 EPMA 방법으로 의미 있는 결과를 도출한 시료는 암석(13.2 µg/g)과 지하수(788.4 µg/L)의 우라늄 함량이 높은 시료 B였다. 시료 B에 대한 backscattered electron image와 microprobe X-ray spectra를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 U은 Apatite (Ap)와 Rutile (Ru) 경계에서 발견되며, Th와 함께 존재하는 것으로 나타내고 있다. Fig. 2에서는 우라늄이 별도의 광물상으로 존재하지만, 역시 Th와 함께 존재하고 있음을 보여준다. 아울러, Fig. 1과 Fig. 2의 EDS 분석 결과에 의하면 우라늄은 우라

높규산염인 coffinite ( $USiO_4$ )로 존재하고 있음을 추정할 수 있다. 그러나 Mapping 결과에 의하면 다른 REE (Rare Earth Element)들과 함께 P와 Ca가 함께 존재 하고 있으므로 우라닐인산염 광물 이나 Uranophane ( $Ca(UO_2)_2(SiO_3OH)_2 \cdot 5H_2O$ ) 등의 우라늄광물들의 존재 가능성도 높다.

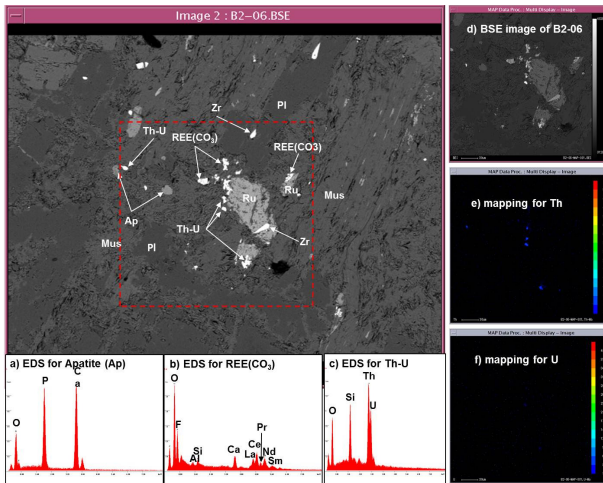


Fig. 1. The backscattered electron images and microprobe X-ray spectra of the sample B (B2-06).

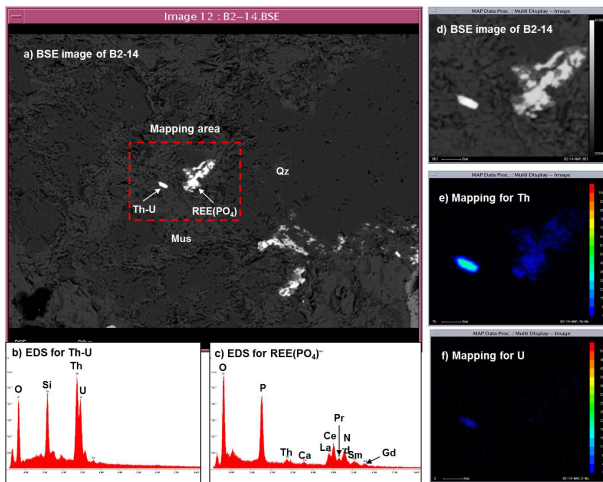


Fig. 2. The backscattered electron images and microprobe X-ray spectra of the sample B (B2-14).

### 2.3 지하수와 의 장기 상호작용

암석 시료들에 대한 우라늄 동위원소 분석결과를 Fig. 3에 나타내었다. 분석결과, 저심도 시료들의 경우 지하수에 의한(열수반응에 기인하는) 풍화의 영향을 받아(Fig. 3a) 암석으로부터 지하수로의 우라늄 침출이 많이 발생하여 지하수중 우라늄 농도가 높은 것으로 판단된다. 이러한 동위원소 분석의 결과는 지하수에서의 우라늄 동위원소 분석결과[2]와 일치하고 있다.

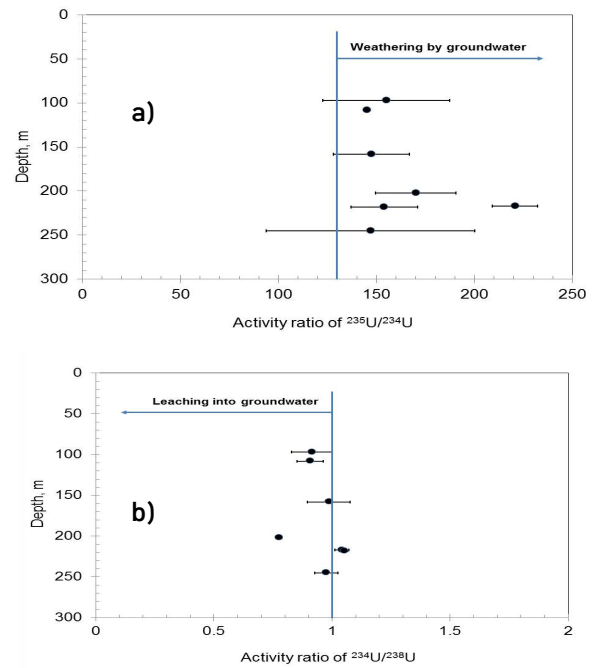


Fig. 3. Analysis results of uranium isotopes depending on depth. a) AR of <sup>235</sup>U/<sup>234</sup>U, b) AR of <sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U.

### 3. 결론

본 연구결과는 화강암반에서 우라늄의 장기거동 해석과 핵종거동을 이해함으로써 처분안전성 신뢰도 향상과 Safety Case 구축에 필요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 2015년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(원자력연구개발사업, No. 2012M2A8A5025589).

### 5. 참고문헌

- [1] J.A.T. Smellie, A.B. MacKenzie, R.D. Scott, "An analogue validation study of natural radionuclide migration in crystalline rocks using uranium-series disequilibrium studies", *Chem. Geol.*, 55, 233-254 (1986)
- [2] M.H. Baik, M.J. Kang, S.Y. Cho, J. Jeong, A comparative study for the determination of uranium and uranium isotopes in granitic groundwater, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 304, 9-14 (2015).